



## Actualización del algoritmo de estimación de la evapotranspiración real para el sensor VIIRS-Suomi NPP

CARLOS M. DI BELLA<sup>1,2,3,✉</sup>; PATRICIO A. ORICCHIO<sup>1</sup>; LUCAS A. GUSMEROTTI<sup>1</sup> & MARCOS TEXEIRA<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Clima y Agua, CIRN, CNIA INTA Castelar. <sup>2</sup>CONICET. <sup>3</sup>Departamento de Métodos Cuantitativos y Sistemas de Información, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. <sup>4</sup>Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección (LART), Instituto de Investigaciones Fisiológicas y Ecológicas Vinculadas a la Agricultura (IFEVA), Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires-CONICET.

**RESUMEN.** Para estudiar, analizar y manejar los agroecosistemas a distintas escalas espaciales y temporales es necesario estimar la evapotranspiración real (ETR). En este trabajo actualizamos los algoritmos de estimación por medio de información espectral del satélite Suomi-NPP; para ello, aplicamos modelos lineales mixtos que consideraron la localidad y el año como factores aleatorios. De esta manera le damos continuidad a los productos de ETR y mejoramos la resolución espacial a ~14 hectáreas.

[Palabras clave: balance de agua, Región Pampeana]

**ABSTRACT.** **Updating of the algorithm estimation of real evapotranspiration (ETR) for the VIIRS-Suomi NPP sensor.** The estimation of the real evapotranspiration (ETR) results in a concrete need for the study, analysis and management of agroecosystems at different spatial and temporal scales. Using spectral information from the Suomi-NPP satellite, we updated the estimation algorithms applying mixed linear models that considered the location and the year as random factors. In this way we give continuity to the ETR products and improve the spatial resolution to ~14 hectares.

[Keywords: water balance, Pampean region]

### INTRODUCCIÓN

La estimación de la evapotranspiración real (ETR) resulta en una herramienta fundamental para el manejo de los recursos naturales o en cualquier planteo productivo que requiera dicha variable para el cálculo de la disponibilidad de agua en el suelo. A partir del cálculo del balance del agua se pueden estimar las necesidades de agua de riego, en sistemas irrigados, o las expectativas de producción y detección de estrés hídrico en sistemas naturales o agrícolas de secano (Brisson et al. 1992).

La gran variabilidad espacial y temporal de la ETR promovió la búsqueda continua de herramientas confiables y económicas para estimar en tiempo real dicha variable biofísica. En este sentido, los sensores remotos proveen información espectral apropiada y permiten estimar la ETR a distintas escalas temporales y con protocolos estandarizados (e.g., Di Bella et al. 2000; Marchesini et al. 2014; Marini et al. 2017).

A partir del trabajo publicado por Di Bella et al. (2000), el Instituto de Clima y Agua

(INTA) genera desde el año 2014 cartografías de evapotranspiración real. Las cartografías se confeccionan cada 10 días a partir de imágenes satelitales del sensor AVHRR-NOAA (<https://tinyurl.com/y2x7e4tt>) capturadas por la antena de recepción del INTA.

Ante las limitaciones operativas actuales del sensor AVHRR y la disponibilidad de nuevos sensores y plataformas satelitales, nos propusimos como objetivo de este trabajo recalibrar el modelo de estimación de ETR a partir de índices de vegetación y temperatura de superficie (Di Bella et al. 2000). En este sentido, usamos los datos provistos por la nueva generación de sensores NPP-Suomi. De esta manera le damos continuidad operativa a los productos agrometeorológicos producidos desde el año 2014.

### MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio comprendió las provincias de Buenos Aires, Córdoba, Entre Ríos, La Pampa y Santa Fe (Figura 1). De un total de 33 estaciones meteorológicas disponibles (INTA; SMN) se seleccionaron 13 emplazadas

Editor asociado: Germán Baldi

✉ carlos.m.dibella@gmail.com

Recibido: 25 de Febrero de 2019

Aceptado: 22 de Julio de 2019

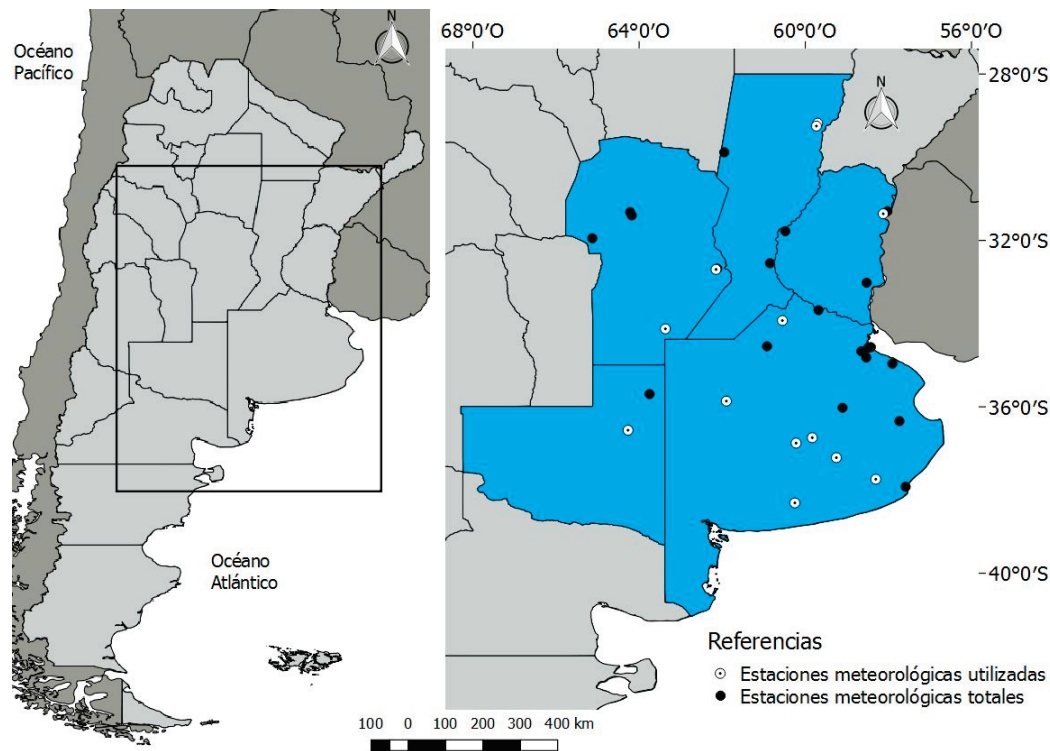


Figura 1. Área de estudio y estaciones meteorológicas utilizadas.  
Figure 1. Study area and meteorological stations used.

en una matriz rural y productiva (más del 75% del área). Para ello se definió un área de 3x3 píxeles (375 m resolución espacial), con centro en la estación meteorológica, sobre la cual se estimó visualmente el uso agrícola del suelo (Google Earth©).

El período de análisis abarcó desde julio de 2015 hasta abril de 2018, período para el cual disponemos de imágenes del nuevo sensor satelital. La evapotranspiración real mensual (ETR- mm/mes) fue estimada mediante el método de balance hidrológico propuesto por Thornthwaite and Mather (1955). Los datos mensuales de precipitación (PP) y de evapotranspiración potencial (ETP) se obtuvieron de cada una de las estaciones seleccionadas. En aquellos casos en los que la PP fue mayor que la ETP, la ETR fue igual que la ETP. En aquellos que la ETP fue mayor a la PP, la ETR fue igual a la sumatoria de la PP y la variación de almacenaje de agua del suelo (Di Bella et al. 2000). La capacidad de retención de agua útil de los suelos de cada estación (Tabla 1) se obtuvo según la clase textural y la zona geomorfológica de pertenencia (Damiano and Taboada 2000). Dicha capacidad se consideró como contenido inicial de humedad al comienzo del cálculo del balance.

En cuanto a la información satelital, la temperatura de superficie (Ts) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (IVN) se obtuvieron a partir de los datos recibidos por el satélite Suomi-NPP con una resolución espacial de 375 m en la antena de recepción satelital del INTA Castelar - Instituto de Clima y Agua. Para cada mes se generaron 3 imágenes con valores acumulados cada

Tabla 1. Capacidad de agua disponible de cada estación utilizada.  
Table 1. Available water capacity of each station used.

| Localidad           | Capacidad de retención de agua útil (mm) |
|---------------------|--|
| Azul (SMN)          | 110                                      |
| Balcarce (INTA)     | 136                                      |
| Barrow (INTA)       | 111                                      |
| Concordia (INTA)    | 74                                       |
| Laboulaye (SMN)     | 89                                       |
| Marcos Juárez (SMN) | 172                                      |
| Olavarría (SMN)     | 109                                      |
| Pehuajó (SMN)       | 81                                       |
| Pergamino (INTA)    | 175                                      |
| Reconquista (SMN)   | 150                                      |
| Reconquista (INTA)  | 150                                      |
| Santa Rosa (SMN)    | 38                                       |
| Tandil (SMN)        | 82                                       |

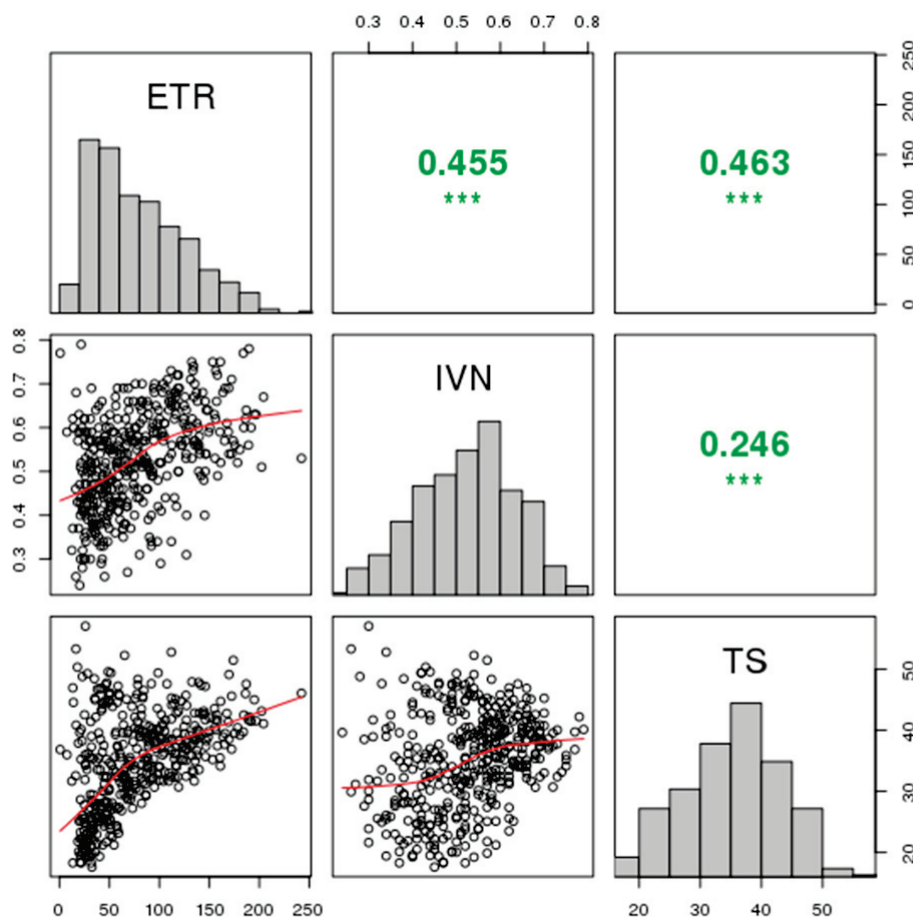
10 días mediante el promedio de 9 píxeles (ventana de 3x3 píxeles) con centro en la estación meteorológica correspondiente. Aquellos valores con una variación de  $\pm 10\%$  con respecto al compuesto decádico anterior fueron descartados. Los datos mensuales de  $T_s$  e IVN se calcularon a través de la media de los valores acumulados para cada compuesto decádico.

La relación entre la evapotranspiración real (mm/mes), el índice de vegetación normalizado (IVN) y la temperatura superficial ( $T_s$ , expresada en  $^{\circ}\text{C}$ ) fue analizada mediante modelos lineales mixtos considerando la localidad y el año como factores aleatorios (Pinheiro and Bates 2000). Dado que el análisis exploratorio de los datos (Figura 2) sugiere no linealidad en las relaciones bivariadas entre ETR e IVN por un lado y ETR y  $T_s$  por el otro, se probaron modelos que consideraron

explícitamente esta no-linealidad mediante polinomios de segundo orden. Seleccionamos el mejor modelo en términos de bondad de ajuste y simplicidad mediante el criterio de información de Akaike (AIC) (Burnham and Anderson 2002). La significancia estadística de los estimadores de los parámetros del modelo final fue aproximada mediante la prueba de Chi2 de Wald (Fox 2008).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El mejor modelo acorde al criterio de información de Akaike para la estimación de la evapotranspiración real (raíz cuadrada de la ETR) fue aquel que consideró los efectos lineales y aditivos del IVN y la  $T_s$  y los efectos aleatorios asociados a la localidad y el momento del año analizado (Tabla 2). El modelo ajustado presentó una correlación



**Figura 2.** Relaciones observadas entre la evapotranspiración real (ETR), el índice de vegetación normalizado (IVN) y la temperatura superficial ( $T_s$ ), así como la correlación entre ellas (sub-diagonal superior) y su distribución (diagonal). (\*\*\*) Representa correlaciones significativas al 0.001.

**Figure 2.** Relations observed between the real evapotranspiration (ETR), the normalized difference vegetation index (NDVI) and the surface temperature ( $T_s$ ), as well as the correlation between them (upper sub-diagonal) and its distribution (diagonal). (\*\*\*) Represents significant correlations to 0.001.

**Tabla 2.** Modelos ajustados a la relación entre la raíz cuadrada de la evapotranspiración ('ETR), el índice de vegetación normalizado (IVN) y la temperatura superficial (Ts). AIC representa el valor del criterio de información de Akaike del modelo asociado y  $r_{\text{obs-pred}}$  la correlación entre la ET observada y aquella predicha por el modelo. El mejor modelo de acuerdo con el valor de AIC se destaca con un signo #.

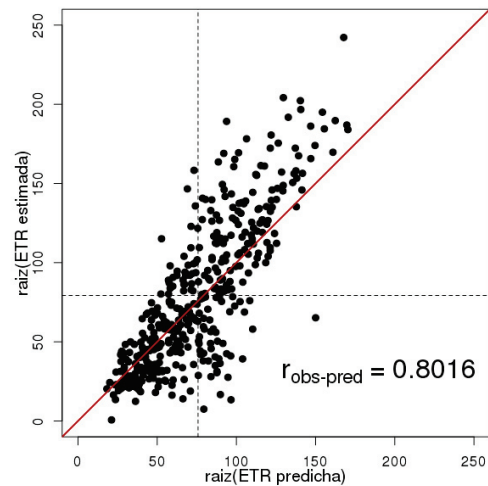
**Table 2.** Models adjusted to the relationship between the square root of the evapotranspiration ('ETR), the normalized difference vegetation index (NDVI) and the surface temperature (Ts). AIC represents the value of the Akaike information criterion of the associated model and  $r_{\text{obs-pred}}$  the correlation between the estimated ETR and that predicted by the model. The best model according to the value of AIC is marked with a #.

| Modelo                            | Efectos aleatorios | AIC     | $r_{\text{obs-pred}}$ |
|-----------------------------------|--------------------|---------|-----------------------|
| IVN+Ts                            | --                 | 1834.3  | 0.5776                |
| IVN*Ts                            | --                 | 1835.7  | 0.5814                |
| IVN <sup>2</sup> +Ts              | --                 | 1830.2  | 0.5781                |
|                                   | --                 | 1827.42 | 0.5875                |
| IVN+Ts <sup>2</sup>               | --                 | 1820.4  | 0.6132                |
| IVN*Ts <sup>2</sup>               | --                 | 1830.5  | 0.6167                |
| IVN <sup>2</sup> +Ts <sup>2</sup> | --                 | 1815.7  | 0.6144                |
| IVN <sup>2</sup> *Ts <sup>2</sup> | --                 | 1827.7  | 0.6205                |
| IVN+Ts                            | localidad          | 1814.6  | 0.6795                |
|                                   | localidad          | 1823.4  | 0.6785                |
| IVN+Ts                            | localidad. año#    | 1786.5  | 0.8016                |
|                                   | localidad. año     | 1792.8  | 0.7997                |
| IVN <sup>2</sup> +Ts              | localidad          | 1817.0  | 0.6783                |
|                                   | localidad          | 1814.1  | 0.6871                |
| IVN <sup>2</sup> +Ts <sup>2</sup> | localidad          | 1814.9  | 0.6939                |
|                                   | localidad          | 1837.7  | 0.6770                |
|                                   | localidad          | 1881.9  | 0.7062                |
| IVN <sup>2</sup> *Ts <sup>2</sup> | localidad          | 1946.2  | 0.7226                |
| IVN <sup>2</sup> +Ts <sup>2</sup> | localidad. año     | 1809.0  | 0.8108                |
| IVN <sup>2</sup> *Ts              | localidad. año     | 1830.5  | 0.8018                |
| IVN*Ts <sup>2</sup>               | localidad. año     | 1949.9  | 0.8537                |

entre valores observados y modelados de ETR de  $r=0.8016$  (o un  $r^2=0.65$ ) (Figura 3). Todos los estimadores de los parámetros en este modelo fueron estadísticamente significativos ( $P<0.0001$  derivado de la prueba de Chi2 de Wald). El modelo resultante es el siguiente:

$$\sqrt{\text{ETR}(\text{mm/día})} = -1.37 + 9.52 \times \text{IVN} + 0.14 \times \text{Ts}$$

El ajuste de este modelo fue ligeramente menor al encontrado con el sensor AVHRR-NOAA ( $r^2=0.75$ ) (Di Bella et al. 2000) y, al



**Figura 3.** Relación entre la raíz cuadrada de la evapotranspiración real estimada ('ETR estimada) y la raíz cuadrada de la evapotranspiración real predicha por el mejor modelo ('ETR predicha). La evapotranspiración real está expresada en mm/día. La línea roja representa la relación 1:1 y  $r_{\text{obs-pred}}$  es el valor de la correlación entre ambas observaciones.

**Figure 3.** Relationship between the square root of the estimated real evapotranspiration ('estimated ETR) and the square root of the real evapotranspiration predicted by the best model ('predicted ETR). Actual evapotranspiration is expressed in mm/day. The red line represents the ratio 1:1 and  $r_{\text{obs-pred}}$  is the value of the correlation between both observations.

igual que en dicho modelo, sobreestimó los valores bajos de ETR y subestimó los altos. Sin embargo, en este trabajo se aumentó no sólo la representatividad temporal (3 años vs 1 año) y espacial ( $n=461$  vs.  $n=41$ ) de los datos, sino que, además, la resolución espacial del sensor VIIRS-NPP nos permitió mejorar la estimación de evapotranspiración real a ~14 hectáreas (contra 100 ha con la versión anterior de AVHRR-NOAA).

Estos resultados son sin duda un gran avance hacia la consolidación en el uso de los productos de ETR estimados mediante de sensores remotos (sepa.inta.gob.ar). Los próximos pasos se centrarán en la asimilación de los mismos en modelos de cálculo de balance de agua en el suelo compatibles con la toma de decisiones a nivel predial y regional.

## REFERENCIAS

- Burnham, K. P., and D. R. Anderson. 2002. Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach, 2<sup>nd</sup> Edition. Springer, Nueva York.
- Damiano, F., and M. A. Taboada. 2000. Predicción del agua disponible usando funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de la Región Pampeana. *Ciencia del Suelo* 18(2):77-88.
- Di Bella, C. M., C. M. Rebella, and J. M. Paruelo. 2000. Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina. *International Journal of Remote Sensing* 21(4):791-797. <https://doi.org/10.1080/014311600210579>.

- Fox, J. 2008. *Applied Regression Analysis and Generalized Linear Models*, 2ª edición, Sage.
- Marchesini, V., R. Fernández, J. Reynolds, J. Sobrino, and C. M. Di Bella. 2014. Changes in evapotranspiration and phenology as consequences of shrub removal in dry forests of Central Argentina". *Ecohydrology* 8(7):1304-1311. <https://doi.org/10.1002/eco.1583>.
- Marini, F.; M. Santamaría, P. Oricchio, C. M. Di Bella, and A. Basualdo. 2017. Estimación de evapotranspiración real (ETR) y de evapotranspiración potencial (ETP) en el sudoeste bonaerense (Argentina) a partir de imágenes MODIS. *Revista AET* 48:29-41. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.6743>.
- Pinheiro, J. C., and D. M. Bates. 2000. *Mixed effects models in S and S-plus*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0318-1>.
- Thornthwaite, C. W., and J. R. Mather. 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Pp. 308 *in* *Publications in Climatology*, vol. 10, no. 3. Drexel Institute of Technology: Laboratory of Climatology.